



# OSCILLATEURS OPTOELECTRONIQUES TOPOLOGIES, PERFORMANCES ET PERSPECTIVES

Olivier Llopis, Khaldoun Saleh, Zeina Abdallah, Vincent Auroux, J Maxin,  
Arnaud Fernandez, Y Chembo, G Cibieli, G Pillet, L Morvan

## ► To cite this version:

Olivier Llopis, Khaldoun Saleh, Zeina Abdallah, Vincent Auroux, J Maxin, et al.. OSCILLATEURS OPTOELECTRONIQUES TOPOLOGIES, PERFORMANCES ET PERSPECTIVES. Horizons de l'Optique, Jul 2015, Rennes, France. hal-01165719

**HAL Id: hal-01165719**

**<https://hal.science/hal-01165719>**

Submitted on 19 Jun 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# OSCILLATEURS OPTOELECTRONIQUES

## TOPOLOGIES, PERFORMANCES ET PERSPECTIVES

O. Llopis<sup>1</sup>, K. Saleh<sup>2</sup>, Z. Abdallah<sup>1,3</sup>, V. Auroux<sup>1,4</sup>, J. Maxin<sup>1,2</sup>,  
A. Fernandez<sup>1</sup>, Y. Chembo<sup>2</sup>, G. Cibiel<sup>3</sup>, G. Pillet<sup>5</sup>, L. Morvan<sup>5</sup>

<sup>1</sup> LAAS-CNRS, Université de Toulouse, 7 av. du Colonel roche, 31031 Toulouse

<sup>2</sup> FEMTO-ST, Dept. Optique, 15B av. Montboucons, 25030, Besançon

<sup>3</sup> CNES, Toulouse, <sup>4</sup> OSAT, Toulouse, <sup>5</sup> Thales R&T, Palaiseau

[llopis@laas.fr](mailto:llopis@laas.fr)

### RÉSUMÉ

Une synthèse des travaux sur les oscillateurs électro-optiques est présentée, en particulier ceux menés ces dernières années en France dans le cadre de différents consortiums de recherche. Les résultats obtenus sont comparés aux alternatives existantes en hyperfréquences.

**MOTS-CLEFS :** *oscillateur micro-onde ; résonateur optique ; bruit de phase.*

### 1. INTRODUCTION

L'oscillateur électro-optique, ou OEO, constitue une des techniques les plus efficaces pour la génération de signaux à très faible bruit de phase aux très hautes fréquences. Ce concept, proposé dans les années 1990 par des chercheurs du JPL [1], a connu de nombreuses évolutions et est décliné aujourd'hui dans des topologies très différentes. Les premiers OEOs étaient basés sur de longues lignes à retard fibrées. Si leurs performances en bruit étaient relativement bonnes près de la porteuse, ce n'était pas le cas aux fréquences correspondant à une rotation complète de phase dans la fibre, où des raies parasites venaient perturber le signal (ex : tous les multiples de 50 kHz pour 4 km de fibre). Certains concepteurs résolvaient ce problème en utilisant plusieurs bobines de fibre, mais ces OEO multi-retards constituaient des systèmes massifs. Par ailleurs, certains problèmes de bruit dans les lignes à retard fibrées de grande longueur n'ont véritablement fait l'objet d'études exhaustives que tardivement [2]. Les années 2000 ont vu l'arrivée d'un concept différent : celui de l'OEO à résonateur optique [3-7]. Si le remplacement d'une ligne à retard par un résonateur pouvait sembler évident a priori, la mise en œuvre de cette approche posait néanmoins de nombreux problèmes pratiques : verrouillage de fréquence laser-résonateur, coefficient de qualité extrême, effets non-linéaires liés à l'accumulation de puissance intra cavité... Le cas du COEO (Coupled Opto-Electronic Oscillator) [8] rentre lui aussi dans la catégorie des oscillateurs à résonateurs, mais cette fois le résonateur est actif. Il s'agit en fait d'une boucle comportant un amplificateur optique et formant ainsi un laser à modes verrouillés, lequel est couplé à une oscillation micro-onde. Les deux oscillateurs s'améliorent chacun grâce à ce couplage : l'oscillateur optique cale sa fréquence de répétition sur l'oscillation micro-onde, et l'oscillation micro-onde profite du facteur de qualité très élevé de la cavité optique active.

### 2. COMPOSANTS POUR LA REFERENCE DE FREQUENCE PAR L'OPTIQUE

Remplacer la résonance micro-onde par une résonance optique suppose que l'on soit capable de produire, par l'optique, des résonances de bien meilleur facteur de qualité  $Q$  que par des technologies micro-ondes. Les résonateurs micro-ondes à fort  $Q$  traditionnellement utilisés sont les résonateurs diélectriques, qui présentent un  $Q$  à vide de l'ordre de  $10^4$  à 10 GHz et un produit  $Q \cdot f$  constant (donc  $Q$  décroissant avec  $f$ ). Dans le cas de l'approche optique, le facteur de qualité optique est réduit lors du passage vers les micro-ondes dans une proportion correspondant au

rapport de fréquence optique / micro-onde, c'est-à-dire d'environ  $10^4$  pour une application à 20 GHz ( $\lambda \sim 1550$  nm). Il faut donc travailler avec des coefficients de qualité optiques largement supérieurs à  $10^8$  pour une source à 10 GHz. Par contre, la contrainte se relâche à plus haute fréquence, où le rapport fréquence optique / fréquence micro-onde diminue et la performance des compétiteurs micro-onde se dégrade. Une fibre optique de plusieurs kilomètres rentre dans cette catégorie des Q extrêmes. L'équivalence retard – coefficient de qualité peut être établie en considérant la pente de phase générée par le retard ( $Q = \pi f\tau$ ). Une bobine de 4 km permet ainsi d'atteindre un Q équivalent de  $1.2 \cdot 10^6$  à 20 GHz. Dans le cas de résonateurs compacts, une telle performance est plus difficile à obtenir, et est encore largement hors de portée de l'optique intégrée. Certains résonateurs Fabry-Perot présentent un facteur Q optique de l'ordre de  $10^{10}$ , mais sont volumineux. Des boucles de fibre faiblement couplées permettent d'atteindre des facteurs Q supérieurs à  $10^9$ , voire proches de  $10^{10}$  sous certaines conditions, et ont l'avantage d'une géométrie planaire [5,6]. Enfin, les résonateurs de type disque à modes de galerie (WGM) atteignent des Q de l'ordre de  $10^8$  à  $10^{10}$ , à condition de présenter un état de surface irréprochable [3]. Ce sont ces deux derniers types de résonateurs qui ont fait l'objet d'implémentations dans des OEOs.

### 3. PERFORMANCES DES OEOs A RESONATEURS

Dans le cas d'OEO stabilisés sur un résonateur à boucle fibrée résonante, un bruit de phase de -128 dBc/Hz à 10 kHz d'une porteuse à 10.2 GHz a pu être obtenu sur un oscillateur basé sur une boucle résonante fibrée de 100 m, associé à un plancher de bruit de phase au-delà de 100 kHz proche de -149 dBc/Hz avec peu de modes parasites, ceci grâce à une étude détaillée du bruit généré dans le résonateur fibré [6]. Dans le deuxième cas, les résultats obtenus ont été plus modestes, principalement à cause de la difficulté d'obtenir des disques WGM de très fort coefficient de qualité, ainsi que des difficultés pratiques liées au couplage à une fibre étirée de ces dispositifs. Les niveaux de bruit de phase mesurés se situent au voisinage de -100 dBc/Hz à 10 kHz [7] d'une porteuse dans la même gamme de fréquence ( $\sim 10$  GHz).

Au-delà de la génération par stabilisation d'un oscillateur micro-onde, une solution élégante pour générer directement des signaux micro-ondes avec ce type de résonateur consiste à profiter de la très forte accumulation d'énergie dans le résonateur, qui permet la génération de battements non-linéaires en utilisant, par exemple, le mélange quatre ondes. Cette approche simplifie notablement le dispositif et d'excellents résultats ont pu être obtenus à très haute fréquence avec cette approche [4]. Enfin, l'approche COEO s'est révélée très intéressante car le laser et le résonateur sont dans ce dispositif un seul et même composant. Avec cette approche, les performances en bruit de phase se situent aux environs de -140 dBc/Hz à 10 kHz de la porteuse, pour 300 m de fibre.

### RÉFÉRENCES

- [1] X.S. Yao and L. Maleki, "Progress in the optoelectronic oscillator - a ten year anniversary review," 2004 IEEE Microwave Theory and Tech. Symp. Digest, pp. 287-290, 2004.
- [2] O. Okusaga, J. Cahill, W. Zhou, A. Docherty, G.M. Carter, C.R. Menyuk, "Optical scattering induced noise in RF-phonic systems" IEEE-Int. Frequency control Symposium and EFTF, San Francisco, May 2011.
- [3] A. Savchenkov, V. Ilchenko, A. Matsko, L. Maleki, "Kilohertz optical resonances in dielectric crystal cavities", Physical Review A, 70, 051804(R), Nov. 2004.
- [4] L. Maleki, V.S. Ilchenko, A. A. Savchenkov, W. Liang, D. Seidel, A.B. Matsko, "High performance, miniature hyper-parametric microwave photonic oscillator", 2010 IEEE Int. Freq. Control Symposium (IFCS), pages 558 – 563, June 2010.
- [5] P.H. Merrer, O. Llopis, G. Cibié, "Laser Stabilization on a Fiber Ring Resonator and Application to RF Filtering", IEEE-Photonics Technology Letters, vol 20, n° 16, July 2008, pp. 1399-1401.
- [6] K. Saleh, O. Llopis, G. Cibié, "Optical Scattering Induced Noise in Fiber Ring Resonators and Optoelectronic Oscillators", Journal of Lightwave Technology, vol. 31, no. 9, pp. 1433,1446, May 1, 2013.
- [7] K. Saleh, G. Lin, Y. Chembo, "Effect of laser coupling and active stabilization on the phase noise performance of optoelectronic microwave oscillators based on whispering gallery mode resonators" IEEE Photonics Journal, Vol 7, N° 1, Feb. 2015.
- [8] X. S. Yao, L. Davis, L. Maleki, "Coupled Optoelectronic Oscillators for Generating Both RF Signal and Optical Pulses", Journal of Lightwave Tech., Jan. 2000, pp. 73-78.